

## Wpływ sposobu łączenia w połączeniu wciskowym na stan warstwy wierzchniej

W artykule przedstawiono wyniki badań autora pokazujące wpływ sposobu wykonania połączenia wciskowego na zmiany w warstwie wierzchniej połączonych elementów. Wykazano różny, złożony obraz rzeczywistego styku powierzchni elementów połączonych przez wtłaczanie i skurcz. W wyniku tego mogą w warunkach eksploatacji występować poślizgi względne pomiędzy połączonymi powierzchniami. Prowadzić to może do rozwoju m.in. zużycia frettingowego.

### 1. Wprowadzenie

Połączenia wciskowe ze względu na prostotę konstrukcji, montażu i niezawodność pracy są szeroko stosowane w budowie maszyn. Należą one do grupy połączeń spoczynkowych. Są to najczęściej połączenia typu walek – tulejka, w których powierzchnie montażowe mogą mieć przekrój walcowy lub stożkowy. Przenoszenie obciążenia przez połączenia wciskowe realizowane jest dzięki występującym na powierzchni połączenia siłom tarcia, uzyskiwanym wskutek zacisku jednego elementu na drugim w wyniku sprężystych odkształceń wywołanych różnicą wymiarów [1]. Istotnym czynnikiem określającym zdolność połączenia do przenoszenia obciążeń (nośność połączenia), jest wartość wcisku, czyli ujemna różnica średnic łączonych powierzchni.

Montaż połączeń wciskowych można wykonywać na drodze wtłoczenia jednego elementu w drugi lub poprzez ogrzanie elementu zewnętrznego albo oziębienie wewnętrznego. Samoistny powolny powrót ich temperatury do temperatury otoczenia powoduje zacisk jednego elementu na drugim. W zależności od wymienionych sposobów montażu połączenia wciskowe dzielimy odpowiednio na: wtłaczane, skurczowe lub rozprężne. Podział ten jest również istotny pod względem możliwości wielokrotnego łączenia i rozłączania elementów.

Połączenia wtłaczane mogą być rozłączane w sposób odwrotny do tego, w jaki były łączone, a po ponownym połączeniu uzyskuje się wcisk skuteczny, w przybliżeniu równy poprzedniemu. Połączenia wtłaczane można więc kilkakrotnie łączyć i rozłączać bez istotnych zmian w ich nośności [1].

Demontaż połączeń skurczowych i rozprężnych w sposób odwrotny do sposobu łączenia jest bardzo trudny. Najprostszy sposób, polegający na wyciśnięciu elementu wewnętrznego za pomocą prasy jest bardzo niekorzystny, ze względu na zniszczenie charakterystycznych cech struktury geometrycznej powierzchni, uzyskanej w wyniku połączenia. Ponowne połączenie elementów, niezależnie od sposobu wykonania, daje jakościowo różne właściwości złącza, szczególnie co do jego nośności [1].

Przykładem zespołu, który zawiera w sobie elementy połączenia wtłaczanego oraz skurczowego, jest zestaw kołowy pojazdu szynowego. Połączeniem wtłaczanym jest połączenie koła z osią, natomiast skurczowym, koła bosego z obręczą.

### 2. Warunki obciążalności połączeń wciskowych

Podczas obciążania połączenia w warunkach eksploatacji siłą styczną  $T$ , momentem skręcającym  $M_s$  lub momentem zginającym  $M_g$ , na powierzchni styku pojawiają się

siły tarcia przeciwdziałające poślizgowi. Aby uniemożliwić wystąpienie poślizgu elementów połączenia względem siebie, nominalny nacisk na powierzchni styku powinien być taki, aby wartość sił tarcia przewyższała wartość sił zewnętrznych [1]. W obliczeniach obciążalności połączeń wciskowych przyjmuje się znaczne uproszczenie, polegające na założeniu równomierności rozkładu nacisku zarówno na obwodzie, jak również na długości powierzchni styku elementów złącza wciskowego. Największą możliwą do uzyskania wartość siły tarcia na powierzchni styku połączenia można więc wyrazić przy pomocy wyrażenia:

$$T = \mu \cdot N = \mu \cdot p \cdot F = \mu \cdot p \cdot \pi \cdot d \cdot l \quad (1)$$

gdzie:  $p$  – nacisk powierzchniowy,  $\mu$  – współczynnik tarcia,  $d$  – średnica połączenia,  $l$  – długość połączenia,  $F = \pi \cdot d \cdot l$  – powierzchnia styku,  $N = p \cdot F$  – siła normalna do powierzchni styku

Wymagany nacisk powierzchniowy  $p$  w połączeniu wciskowym, który powinien uniemożliwić poślizg względem połączonych elementów, wyrażony jest następująco [1]:

a) w przypadku działania zewnętrznej siły stycznej  $P$ :

$$p \geq \frac{k \cdot P}{\mu \cdot \pi \cdot d \cdot l} \quad (2)$$

b) w przypadku działania momentu skręcającego  $M_s$ :

$$p \geq \frac{2k \cdot M_s}{\mu \cdot \pi \cdot d^2 \cdot l} \quad (3)$$

c) w przypadku działania momentu zginającego  $M_g$ :

$$p \geq \frac{3M_g}{\chi \cdot d \cdot l^2} \quad (4)$$

gdzie:  $k$  – współczynnik nadwyżki nośności, uwzględniający ewentualne przeciążenia oraz zmiany współczynnika tarcia ( $k = 1,5 \div 2$ ),  $\chi$  – współczynnik nierównomierności rozkładu nacisków ( $\chi = 0,8 \div 0,6$ ).

Średnią wartość nacisków powierzchniowych określa się najczęściej ze wzoru, który opiera się na rozwiązaniu zadania Lamego [2]:

$$p_{sr} = \frac{w}{d} \left( \frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right)^{-1} \quad (5)$$

Jeżeli przyjmie się, że wał jest pełny, a własności mechaniczne obu elementów są zbliżone tak, że można przyjąć  $E_1 = E_2 = E$  oraz  $\nu_1 = \nu_2 = \nu$  to wzór (5) przyjmie postać:

$$p_{sr} = \frac{w}{d} 0,5 \cdot E \left[ 1 - \left( \frac{d}{d_2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

gdzie:  $w$  – wartość wcisku,  $d_2$  – średnica zewnętrzna tulei,

Z wzoru (6) wynika, że przy stałych wymiarach połączenia wartość nacisków powierzchniowych będzie funkcją wartości wcisku i to wprost proporcjonalną. Ponadto zakłada się, że rozkład nacisków jest równomierny na całej długości połączenia. Niektórzy autorzy uwzględniają wpływ chropowatości powierzchni łączonych elementów na rzeczywistą wartość nacisków powierzchniowych [3], [4]. Powierzchnie o dużej chropowatości wyjściowej mogą w istotny stopniu zmniejszyć wartość wcisku skutecznego w wykonywanym połączeniu. Na przykład J. Ryś [3] uważa, że przy ostatecznym ustaleniu wartości wcisku w połączeniu, należy dodatkowo zwiększyć wcisk  $w$  o wartość  $\Delta w$ :

$$\Delta w = 1,5(R_{a1} + R_{a2}) \quad (7)$$

gdzie:  $R_{a1}$ ,  $R_{a2}$  – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości łączonych elementów.

W dotychczas stosowanych obliczeniach nie uwzględnia się wpływu sposobu wykonania połączenia na wartość nacisków powierzchniowych łączonych elementów. Należy sądzić, że zarówno sposób wykonania połączenia, jak i wartość wcisku oraz chropowatość powierzchni będą w istotny sposób wpływać na zmiany w warstwie wierzchniej łączonych powierzchni. Pociąga to za sobą różną rzeczywistą powierzchnię styku łączonych elementów, a to z kolei różną wartość nacisków powierzchniowych na długości połączenia.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań autora pokazujące wpływ sposobu wykonania połączenia na rzeczywisty stan warstwy wierzchniej [5].

### 3. Badania powierzchni styku

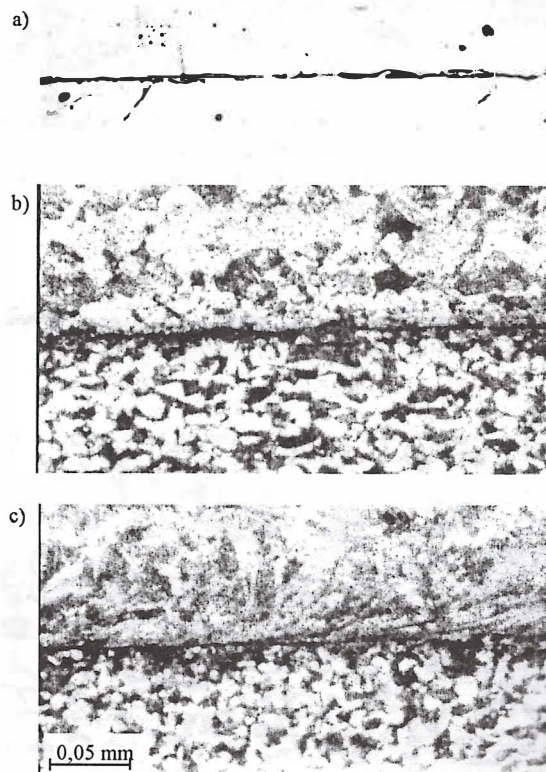
W artykule ograniczono się do przedstawienia wyników badań dla połączeń o takiej samej chropowatości początkowej powierzchni montażowych. Badania dotyczyły połączenia wciskowego tulejki i wałka. Chropowatość początkowa tulejki była w zakresie  $R_a = 2,28 \mu\text{m}$ , a wałka  $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ . Przyjęto dwa sposoby wykonania połączenia: jako połączenie wtlaczane oraz skurczowe. Połączenia wykonano dla dwóch wartości wcisku: 0,01 i 0,04 mm w celu wykazania ewentualnych różnic w warstwie wierzchniej. Po wykonaniu modeli połączeń według wymienionych wariantów wycinano z nich próbki do badań metalograficznych. Obejmowały one całą długość styku połączenia wałka z tulejką w płaszczyźnie równoległej do osi wałka. Wycięte próbki zapewniały, co było niezwykle ważne dla prowadzonych obserwacji, trwałość wykonanego wcześniej połącze-

nia (nie dopuszczalne były przemieszczenia poosiowe lub obwodowe tulejki względem wałka). Obserwacje powierzchni próbek wykonywano na zglądach nietrawionych oraz trawionych. Zglądy nietrawione miały pokazać rzeczywisty zarys styku obu łączonych elementów z jego wszystkimi deformacjami i uszkodzeniami. Zglądy trawione natomiast – ewentualne deformacje i uszkodzenia w warstwie wierzchniej łączonych elementów. Na kolejnych rys. 1 ÷ 4 przedstawiono zdjęcia charakterystycznych obrazów styku podpięcia wałka i tulejki dla poszczególnych sposobów łączenia i różnych wartości wcisku.

Pokazane na rys. 1 ÷ 4 obrazy powierzchni styku połączeniu wałka i tulejki wskazują na jego zróżnicowanie w zależności od sposobu łączenia i wartości wcisku. Szczególnie wyraźna różnica obrazu powierzchni styku występuje w zależności od sposobu wykonania połączenia.

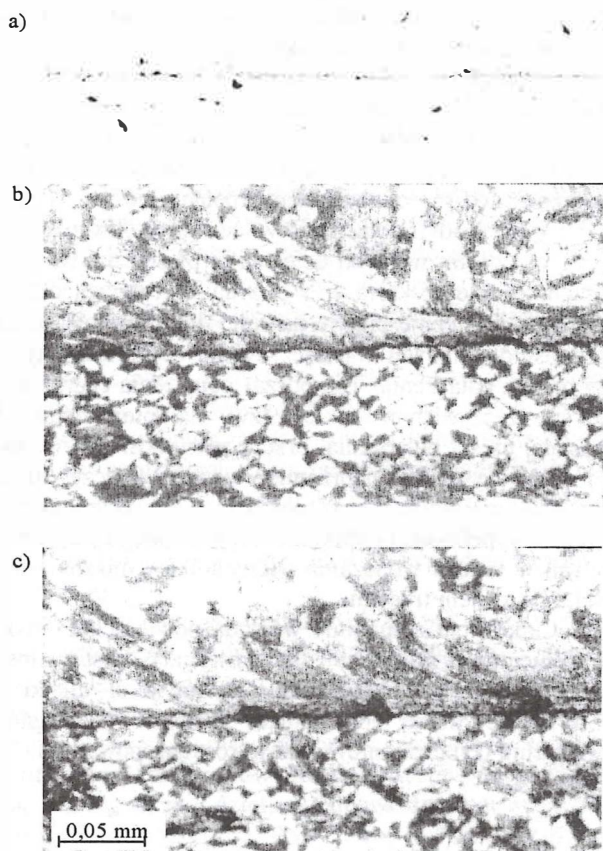
W przypadku połączenia wtlaczanego obserwuje się przede wszystkim wyraźną deformację plastyczną warstwy wierzchniej tulejki, która przy dużych wartościach wcisku (0,04 mm) występuje prawie na całej długości połączenia, natomiast dla małych wartości wcisku (0,01 mm), tylko przy brzegu połączenia. Ten obszar połączenia charakteryzuje się rzeczywistym stykiem tzw. ciał pierwszych. W pozostałej części połączenia, przede wszystkim dla wcisku 0,01 mm, występują naprzemian obszary rzeczywistego styku ciał pierwszych oraz obszary z charakterystyczną szczeliną wypełnioną produktami zużycia, pochodzącymi ze ściętych w trakcie wtlaczania wierzchołków mikronierówności, tzw. ciałem trzecim.

Całkowicie odmiennie wygląda powierzchnia styku obu elementów w połączeniu skurczowym. Wzrost wartości wcisku powoduje wnikanie mikronierówności tulejki w powierzchnię wałka, powodując ściślejsze przyleganie powierzchni obu elementów oraz wzrost chropowatości.

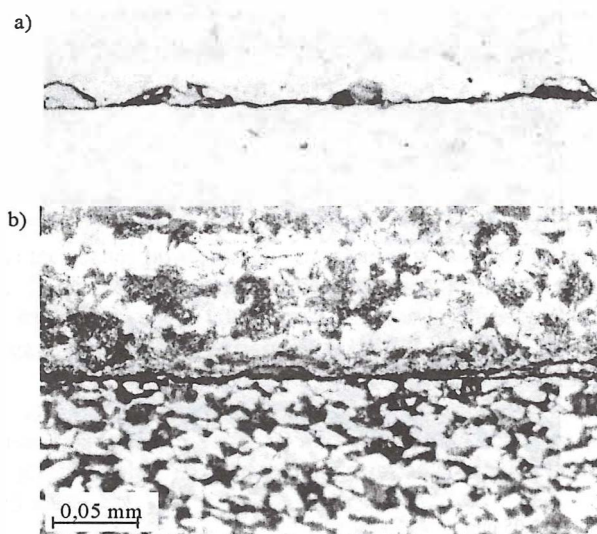


Rys.1. Obrazy powierzchni styku wałka i tulejki, połączenie wtlaczane, wcisk 0,01 mm, pow. 320x, a – nietrawiona, b – trawiona, w części środkowej, c – trawiona, przy brzegu połączenia

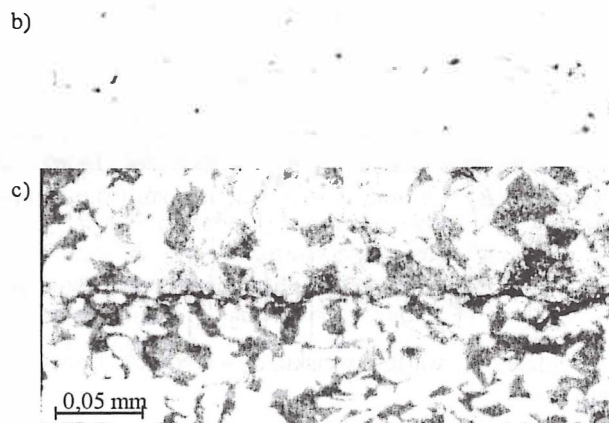
Przy mniejszych wciskach (0,01 mm) styk powierzchni charakteryzuje się nierównomierną szczeliną na długości połączenia, która rozdziela obie powierzchnie. Jest ona wypełniona produktami zużycia powstałymi w wyniku wykruszenia mikrowystępów, a także zwiera puste przestrzenie. Obok występowania szczelin mają również miejsce cyklicznie powtarzające się obszary rzeczywistego styku ciał pierwszych.



Rys.2. Obrazy powierzchni styku wałka i tulejki, połączenie wtlaczane, wcisk 0,04 mm, pow. 320x, a – nietrawiona, b – trawiona, w części środkowej, c – trawiona, przy brzegu połączenia



Rys.3. Obrazy powierzchni styku wałka i tulejki, połączenie skurczowe, wcisk 0,01 mm, pow. 320x, a – nietrawiona, b – trawiona



Rys.4. Obrazy powierzchni styku wałka i tulejki, połączenie skurczowe, wcisk 0,04 mm, pow. 320x, a – nietrawiona, b – trawiona

Porównując obrazy powierzchni styku wałka i tulejki ze względu na sposób wykonania połączenia można stwierdzić, że:

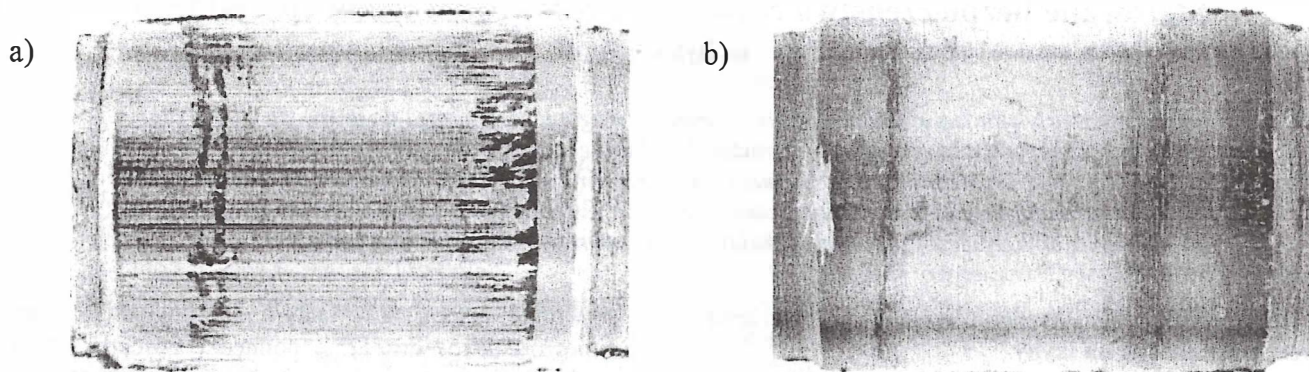
- Połączenie wtlaczane prowadzi do znacznych deformacji plastycznych w warstwie wierzchniej tulejki i zwiększa powierzchnię rzeczywistego styku ciał pierwszych ze wzrostem wartości wcisku, szczególnie po stronie przeciwnej w stosunku do której wykonuje się wtlaczanie. Styk obu powierzchni nie jest równomierny na jego długości. Przy brzegu połączenia, przede wszystkim po stronie od której rozpoczyna się wtlaczanie, brak jest bezpośredniego styku powierzchni. Występuje szczelina wypełniona produktami ciała trzeciego. Dopiero w dalszej części połączenia ma miejsce rzeczywisty styk ciał pierwszych.
- Połączenie skurczowe charakteryzuje się równomiernym stykiem skojarzonych powierzchni na całej długości połączenia, brakiem wyraźnych odkształceń plastycznych w warstwie wierzchniej, dużą powierzchnią rzeczywistego styku obu powierzchni oraz zwiększaniem się chropowatości powierzchni ze wzrostem wartości wcisku. Szczególną cechą połączenia skurczowego jest to, że wszelkie deformacje lub uszkodzenia powierzchni, powstałe w wyniku połączenia, rozkładają się cyklicznie na całej długości.

#### 4. Zakończenie

Przytoczone obrazy powierzchni styku obu elementów pokazują, jak sposób wykonania połączenia może w różnym stopniu zmieniać charakter rzeczywistego styku połączonych elementów. Wskazuje to, że obliczenie nacisków powierzchniowych w połączeniu wg przytoczonych w rozdz.2 wzorów, może w warunkach eksploatacji prowadzić do przykrych niespodzianek. Pomimo, że połączenie powinno spełniać warunek nośności wynikający z przyjętych wartości nacisków powierzchniowych, w warunkach eksploatacji mogą występować m.in. procesy zużycia frettingowego. Są one związane z występowaniem mikropoślizgów względnych pomiędzy powierzchniami połączonych elementów. Na rys.5 przytoczono obraz powierzchni wałków, które w połączeniu wciskowym z tulejką pracowały w warunkach obrotowego zginania. Dla obu modeli przyjęto

taką samą wartość wcisku oraz chropowatość powierzchni montażowych, ale różny sposób wykonania połączenia. Można zaobserwować wyraźny obraz uszkodzeń

frettingowych na powierzchni wałka, w przypadku którego połączenie wykonane było przez wtlaczanie. Natomiast brak takiego zużycia dla połączenia skurczowego.



Rys.5. Fotografie powierzchni wałków po badaniach zużyciowych, wcisk 0,04 mm, pow. ok. 3x;  
a – połączenie wtlaczane, b – połączenie skurczowe

- [1] Krukowski A., Tutaj J.: *Połączenia odkształceniowe*. PWN Warszawa, 1987.  
[2] Балацкий Л.Т.: *Прочность прессовых соединений*. Изд. Техника, Киев, 1982.  
[3] Ryś J.: *Urządzenia i konstrukcje mechaniczne*. Wyd. PK, Kraków, 1982.

- [4] Calikowski R., Oleksiak Z., Pytko S., Skorupa A.: *Ultradźwiękowa diagnostyka połączeń ciernych*. PWN, Warszawa, 1989.  
[5] Guzowski S.: *Analiza zużycia frettingowego w połączeniach wciskowych na przykładzie osi zestawów kołowych pojazdów szynowych*. Monografia 284, Wyd. PK, Kraków 2003.